

Как видно из таблицы, в случае, когда опорный сигнал $b(t)$ не совпадает по частоте с анализируемым сигналом, ВАХ получается не замкнутой. При совпадении частот ВАХ замкнута, либо вырождается в прямую в случае совпадения фазы.

Для определения амплитуды гармоники частотой 50 Гц используем тот факт, что площадь ВАХ и реактивная мощность сдвига максимальны, что соответствует максимальному значению реактивной мощности при $\varphi'_k = \varphi_k \pm 90^\circ$. Амплитуда k -той составляющей сигнала найдется по формуле

$$A_{mk} = \frac{\frac{1}{2\pi} F_{\text{ВАХ max}}}{\frac{1}{2} B_{mk}}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентиляционных преобразователей. — М.: Энергия, 1978. — 320 с.
2. Функциональный контроль и диагностика электромеханических и электротехнических устройств и систем по цифровым отсчетам мгновенных значений токов и напряжений / Под ред. Е.И. Гольдштейна. — Томск: Печатная мануфактура, 2003. — 240 с.
3. Пат. на ПМ 41373 РФ. МПК⁷ G01R 21/00. Устройство для измерения реактивной мощности сдвига в трехфазной трехпровод-

ной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 07.06.2004.

4. Заключение

Полученная методика определения спектра многочастотного сигнала с помощью вольт-амперной характеристики является законченной и вполне работоспособной для широкого спектра сигналов. Все формулы методики легко трансформируются для обработки массивов цифровых отсчетов.

4. Пат. на ПМ 41158 РФ. МПК⁷ G01R 25/00. Устройство для измерения коэффициента мощности в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 31.03.2004.
5. Пат. 2229725 РФ. МПК⁷ G01R 23/16. Способ спектрального анализа периодического многочастотного сигнала / Е.И. Гольдштейн, Н.Л. Бацева. Заявлено 12.11.2002; Опубл. 27.05.2004; Бюл. № 15. — 11 с.: ил.

УДК 621.317.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЕЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПО МАССИВАМ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

А.О. Сулайманов, Е.И. Гольдштейн

Томский политехнический университет
E-mail: sao@tpu.ru

Для определения неактивной мощности предложено использовать интегралы обратной мощности за четверть периода, для определения мощности сдвига — площадь вольт-амперной характеристики, а мощность искажения находить как разность между неактивной мощностью и мощностью сдвига. Показана работоспособность предложенных методик для одно- и трехфазных цепей переменного тока.

При рассмотрении методик определения неактивной мощности и ее составляющих в несинусоидальных режимах авторами была проведена ревизия известных и предложены новые алгоритмы для одно- и трехфазных цепей [1–6].

Ниже кратко рассматриваются основные расчетные формулы (п. 1), результаты экспериментальных исследований однофазных (п. 2) и трехфазных (п. 3) цепей, а также выводы и рекомендации (п. 4).

1. Основные понятия и расчетные формулы

В ходе исследований авторы использовали следующие понятия:

- мощность сдвига Q_c (реактивная мощность сдвига) — часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, обусловленные взаимодействием одинаковых по частоте гармоник тока и напряжения;
- мощность искажения $Q_{\text{и}}$ — часть реактивной мощности, которая характеризует процессы, обусловленные взаимодействием разных по частоте гармоник тока и напряжения;
- неактивная мощность Q_n (полная реактивная мощность) — реактивная мощность, которая характеризует процессы взаимодействия всех без исключения гармоник тока и напряжения.

В развитие работ О.А. Маевского [7] мощность сдвига предложено определять через площадь (F_{BAX}) вольт-амперной характеристики (BAX) [1]

$$Q_C = \frac{1}{4\pi} F_{BAX} = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N [(u(t_j) - u(t_{j+1}))((i(t_j) + i(t_{j+1})))], \quad (1)$$

где $u(t_j)$, $u(t_{j+1})$, $i(t_j)$, $i(t_{j+1})$ – значения напряжения и тока в дискретные моменты времени

$$t_{j-1}, \quad t_j, \quad t_{j+1}, \quad t_j - t_{j-1} = \Delta t,$$

Δt – шаг дискретизации массивов тока (напряжения).

Для определения неактивной мощности, в развитие работ Ю.В. Бакова [8], предложено использовать интегралы мгновенной обратной мощности ($p_{обp}$) за четверть периода

$$\begin{aligned} Q_I &= \frac{4}{T} \int_0^{T/4} p_{обp}(t) dt = \frac{4}{N} \sum_{j=0}^{N/4} p_{обp}(t_j); \\ Q_{II} &= \frac{4}{T} \int_{T/4}^{T/2} p_{обp}(t) dt = \frac{4}{N} \sum_{j=N/4}^{N/2} p_{обp}(t_j); \\ Q_{III} &= \frac{4}{T} \int_{T/2}^{3T/4} p_{обp}(t) dt = \frac{4}{N} \sum_{j=N/2}^{3N/4} p_{обp}(t_j); \\ Q_{IV} &= \frac{4}{T} \int_{3T/4}^T p_{обp}(t) dt = \frac{4}{N} \sum_{j=3N/4}^N p_{обp}(t_j). \end{aligned}$$

Обратная мгновенная мощность рассчитывается при ранее найденной активной (средней за период) мощности:

$$\begin{aligned} p_{обp}(t) &= p(t) - P; \\ p(t) &= u(t) i(t); \\ P &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p(t_j); \\ N &= \frac{T}{\Delta t}; \end{aligned}$$

T – период функции тока (напряжения).

Неактивная мощность рассчитывается по формуле

$$Q_H = \frac{1}{2} (Q_I + Q_{III}) = \frac{1}{2} (Q_{II} + Q_{IV}). \quad (2)$$

Формулы для прямого определения мощности искажений авторам не известны, поэтому предлагается определять ее через неактивную мощность (2) и мощность сдвига (1)

$$Q_H = Q_H - Q_C.$$

В трехфазных четырехпроводных электрических цепях суммарные неактивные мощности определяются как сумма неактивных мощностей фаз.

$$Q_{\Sigma} = Q_A + Q_B + Q_C.$$

В трехфазных трехпроводных цепях, при неуступной нулевой точке, трехфазная цепь рассматривается как двухфазная с нулевым проводом, где роль нулевого провода играет третья фаза.

$$Q_{\Sigma} = Q_{AC} + Q_{BC}. \quad (3)$$

Для проверки работоспособности описанных процедур были проведены вычислительные эксперименты для одно- и трехфазных цепей. При получении массивов токов и напряжений использовалась программа моделирования PSpice. При моделировании процедур определения неактивной мощности и ее составляющих были использованы оригинальные программы, созданные в среде Delphi.

2. Однофазные цепи

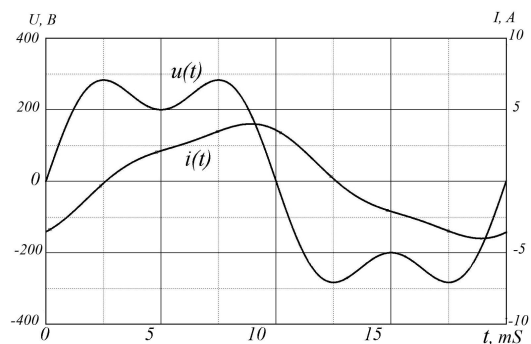
В таблице приведены основные результаты вычислительных экспериментов.

На рис. 1 и 2 приведены графики $u(t)$, $i(t)$, мгновенной $p(t)$ и активной мощности P , обратной мощности $p_{обp}(t)$, а также построена BAX для примеров № 4 и № 8.

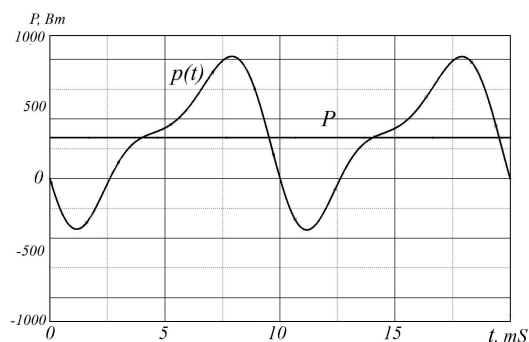
Первый пример в таблице показывает работоспособность формул (1) и (2) для синусоидального режима. В случае появления нечетной гармоники в токе или в напряжении (примеры № 2, 3, 3а) мощность сдвига не изменяется, а неактивная мощность изменяет свое значение на величину мощности сдвига. Это подтверждают примеры № 5 и 6, где

Таблица. Результаты экспериментальных расчетов для однофазной цепи

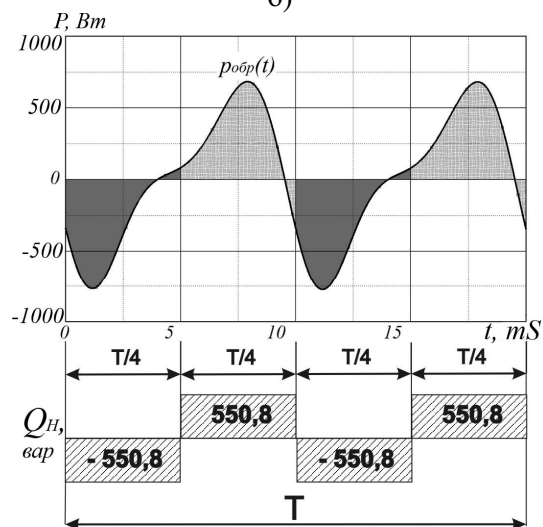
| № примера | Напряжение и ток | Активная мощность | Неактивная мощность | Мощность сдвига | Мощность искажения |
|-----------|---|-------------------|---------------------|-----------------|--------------------|
| | | P , Вт | Q_H , вар | Q_C , вар | Q_H , вар |
| 1 | $u(t)=300\sin\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)$ | 335 | 461,1 | 461,1 | 0 |
| 2 | $u(t)=300\sin\omega t+100\sin 3\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54);$ | 335 | 616,6 | 461,1 | 155,5 |
| 3 | $u(t)=300\sin\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)+0,513\sin(3\omega t-75,1)$ | 335 | 387,1 | 461,1 | -74 |
| 3а | $u(t)=300\sin\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)+0,513\sin(3\omega t+75,1)$ | 335 | 535,1 | 461,1 | 74 |
| 4 | $u(t)=300\sin\omega t+100\sin 3\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)+0,513\sin(3\omega t-75,1)$ | 341,6 | 550,8 | 535,5 | 15,3 |
| 5 | $u(t)=300\sin\omega t; i(t)=0,513\sin(3\omega t-75,1)$ | 77 | 74 | 0 | 74 |
| 6 | $u(t)=100\sin\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)$ | 190 | 155,5 | 0 | 155,5 |
| 7 | $u(t)=100\sin\omega t; i(t)=0,513\sin(3\omega t-75,1)$ | 25,7 | 8,26 | 74,4 | -66,1 |
| 8 | $u(t)=300\sin\omega t+100\sin 2\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)+0,74\sin(2\omega t-68,2)$ | 612,1 | 461,1 | 529,8 | -68,7 |
| 9 | $u(t)=300\sin\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)+0,74\sin(2\omega t-68,2)$ | 580,7 | 461,1 | 461,1 | 0 |
| 9а | $u(t)=300\sin\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)+0,74\sin(2\omega t+68,2)$ | 580,7 | 461,1 | 461,1 | 0 |
| 10 | $u(t)=300\sin\omega t+100\sin 2\omega t; i(t)=3,8\sin(\omega t-54)$ | 600,1 | 461,1 | 461,1 | 0 |



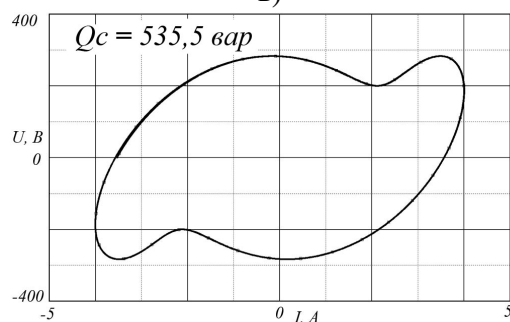
а)



б)

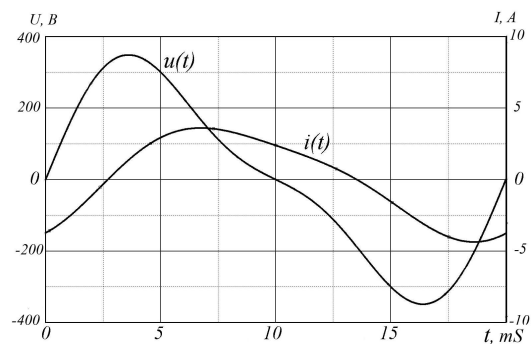


в)

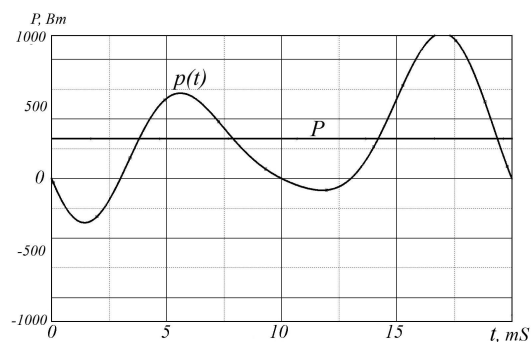


г)

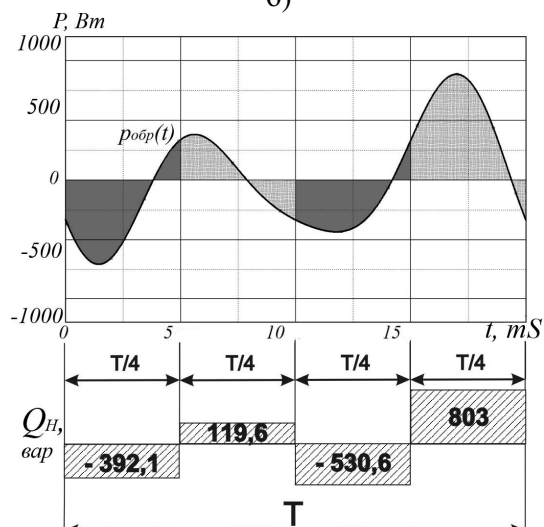
Рис. 1. Графики для примера № 4



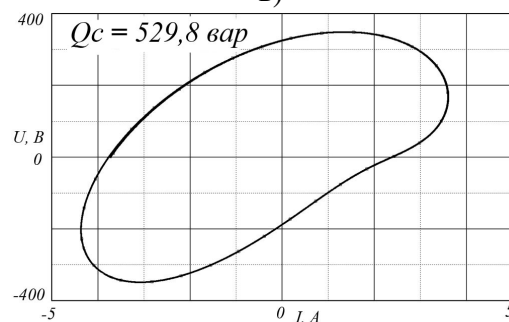
а)



б)

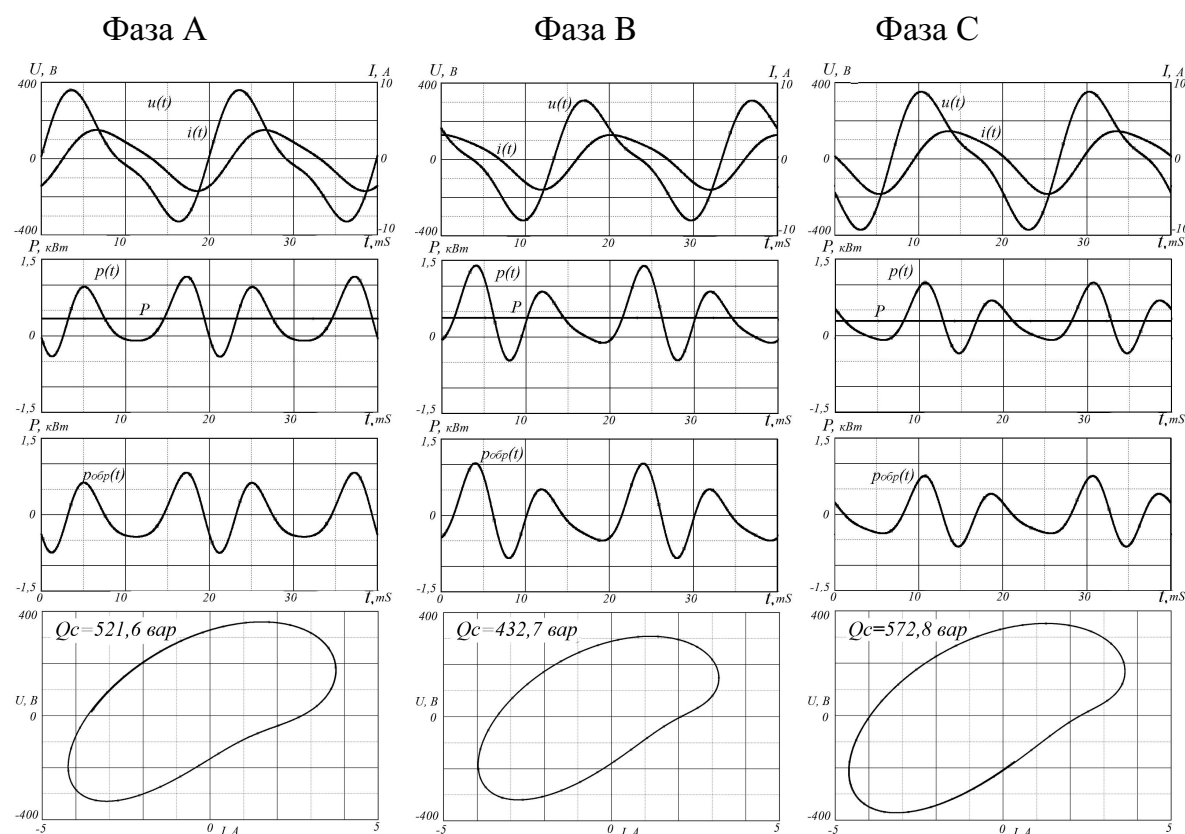


в)



г)

Рис. 2. Графики для примера № 8



| Фазы | P , Вт | Q_H , вар | Q_C , вар | Q_H , вар |
|------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| A | 341,7 | 420 | 521,6 | 101,6 |
| B | 284,6 | 388,9 | 432,7 | 43,6 |
| C | 375,6 | 518,7 | 572,8 | 54,1 |
| Для трехфазной системы | 1001,9 | 1327,6 | 1527,1 | 199,5 |

Рис. 3. Графики и результаты расчетов для примера № 11

показаны результаты расчетов для случаев взаимодействия основной и третьей гармоник. Следует отметить изменение знака мощности искажений при изменении знака фазы нечетной гармоники (примеры № 3, 3а). Пример № 7 демонстрирует, что для случая, когда в токе и напряжении присутствует только нечетная гармоника, мощность сдвига определяется правильно, что нельзя сказать о неактивной мощности и мощности искажения. Значение последней в этом случае должно равняться нулю.

В случаях с четными гармониками (примеры № 8–10) мощность искажения при определении неактивной мощности не учитывается. А мощность сдвига рассчитывается правильно. Кроме того в неактивной мощности не учитывается и реактивная мощность третьей гармоники.

3. Трехфазные цепи

На рис. 3 показаны графики напряжений, токов и мощностей отдельных фаз трехфазной четырех-

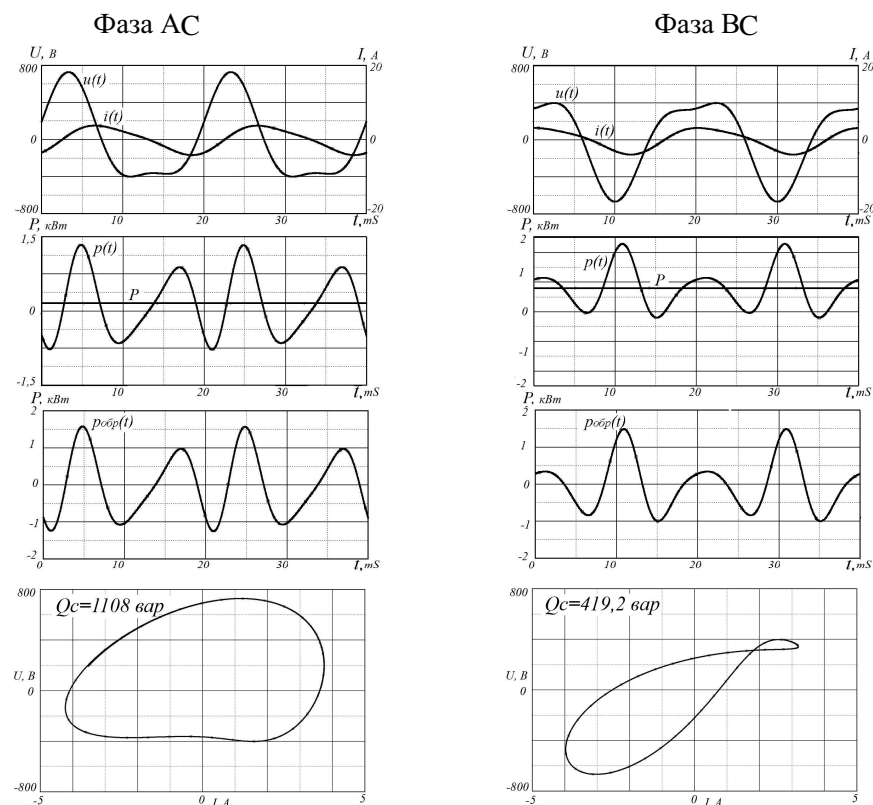
проводной сети (пример № 11). Здесь же приведены результаты расчетов мощностей Q_H , Q_C , Q_H для каждой фазы и системы в целом, при несимметрии токов и напряжений отдельных фаз и наличия в них нечетных гармоник.

На рис. 4 приведены графики и результаты расчета суммарной мощности трехфазной трехпроводной цепи (пример № 12) через мощности искусственных фаз АВ и ВС, см. формулу (3). Фазные токи и напряжения – как в примере № 11.

Сопоставление результатов расчетов трехфазной цепи представленные на рис. 2 и 3 показывают, что для методики с использованием искусственных фаз АС и ВС годится только формула определения мощности сдвига (1).

4. Выводы

4.1. Примеры № 1, 2, 4–8 убедительно показывают, что мощность сдвига определяется только одинаковыми по частоте гармониками тока и напряжения.



| Фазы | P , Вт | Q_H , вар | Q_C , вар | Q_H , вар |
|------------------------|----------|-------------|-------------|-------------|
| AC | 206,4 | 754,6 | 1108 | 353,4 |
| BC | 795,5 | 726,3 | 419,2 | -307,1 |
| Для трехфазной системы | 1001,9 | 1480,9 | 1527,2 | 46,3 |

Рис. 4. Графики и результаты расчетов для примера № 12

- 4.2. Примеры № 3 и 3а свидетельствуют об изменении знака мощности искажения при изменении знака фазового сдвига третьей гармоники тока. Это говорит о том, что мощность искажения учитывается в неактивной мощности, определяемой по формуле (5).
- 4.3. Примеры № 9, 9а, 10 подтверждают мнение о том, что в неактивной мощности, формула (2),

не учитывается мощность искажения при взаимодействии нечетных и четных гармоник тока (напряжения).

- 4.4. Примеры № 11, 12 подтверждают работоспособность предложенного авторами способа измерения мощности сдвига в трехфазной трехпроводной цепи при недоступности нуля нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных значений тока и напряжения // Под ред. Е.И. Гольдштейна. – Томск: Печатная мануфактура, 2003. – 240 с.
2. Сулайманов А.О. Реактивная мощность в несинусоидальных режимах однофазной цепи // Современные техника и технологии: Труды 8-й Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, Изд-во ТПУ, 2002. – Т. 1. – С. 62–63.
3. Гольдштейн Е.И., Сулайманов А.О., Бацева Н.Л. Использование циклической вольт-амперной характеристики при экспериментальных исследованиях электротехнических устройств и систем // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Труды Всеросс. научно-практ. конф. – Томск, 2002. – С. 42–44.
4. Goldstein E., Batseva N., Sulaimanov A., Valov B. Ein Berechnungsverfahren von Lastcharakteristika durch Momentanwerte von Stromen und Spannungen // Technische Universität Ilmenau. 48 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium, 22–25 Sept. 2003. – Tagungsband, 2003. – S. 569–570.
5. Пат. 2223509 РФ. МПК' G01R 21/06. Способ измерения мощности искажения в однофазной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 29.04.2002.
6. Пат. на ПМ 41373 РФ. МПК' G01R 21/00. Устройство для измерения реактивной мощности сдвига в трехфазной трехпроводной цепи переменного тока / Е.И. Гольдштейн, А.О. Сулайманов. Заявлено 07.06.2004.
7. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
8. Баков Ю.В. Мощность переменного тока. – Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического ун-та, 1999. – 252 с.